

# 第6回測位技術懇話会

## VTOL型ドローンの研究開発



神戸大学大学院システム情報学研究科

浦久保 孝光

平成29年10月27日

# ドローン研究への取り組み

- 2007年10月～2009年3月 Carnegie Mellon Univ.

・金出武雄先生

固定翼型



- 2009年～2013年 神戸大学

飛行船型

・深尾隆則先生



- 2010年～ 神戸大学

・金出武雄先生, 深尾隆則先生の協力のもと開始

VTOL型  
(ティルトロータ)

独自機体の開発



- 2015年1月～ エアロセンス(株)との共同研究



# 垂直離着陸 (VTOL) 型ドローン

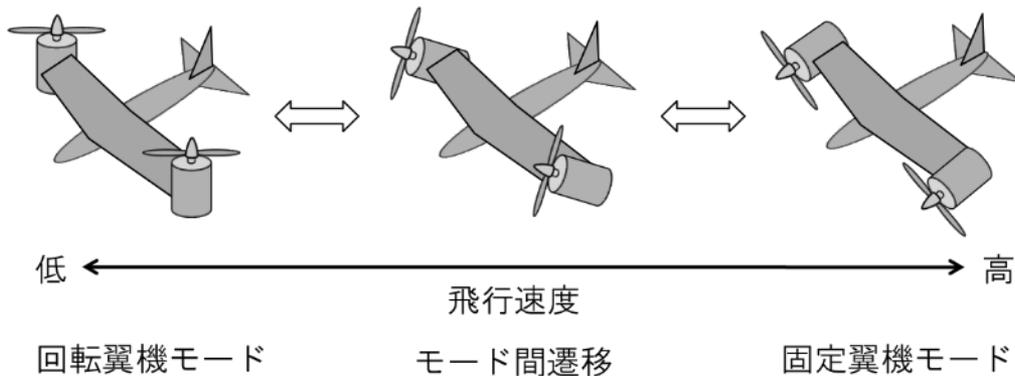
- VTOL (Vertical Take-Off and Landing) 機
  - ティルト機構などを用いて、固定翼機モードと回転翼機モードを切り替え可能な航空機
  - 固定翼機モード: 長距離/高速飛行
  - 回転翼機モード: 垂直離着陸/ホバリング → 狭隘地運用性

	回転翼型	固定翼型
浮上原理	ロータ推力	主翼揚力
飛行時間	短い	長い
最高速度	やや遅い	速い
航続距離	短い	長い
狭隘地運用	可	不可

両者の長所を活かして  
マルチコプタのように運用しやすく  
固定翼機のように長距離/高速移動が可能

# VTOL機の代表例と形式

- V-22 オスプレイ(ティルトロータ形式)
  - ロータをティルトして, 固定翼機モードと回転翼機モードを切り替える



- VTOLの形式
  - ティルトロータ
  - ティルトウィング
  - テイルシッター
  - 揚力・推力分離式

# ティルトロータ形式1

- ロータをティルトして，固定翼機モードと回転翼機モードを切り替える
- 有人機
  - 1920年代 Henry Berliner tiltpropeller helicopter
  - 1950年代 XV-3, 1970年代 XV-15
  - V-22 オスプレイ 1999年 量産機初飛行
- 無人機(オスプレイと同形状)
  - Bell Eagle Eye (アメリカ)
    - 1998年初飛行, 全幅7.4m
  - 韓国
    - S. Choi et al., Journal of Aircraft, 2010, 全幅2m
  - 中国
    - S. Yanguo et al., Chinese Journal of Aeronautics, 2009, 全幅2.9m
  - ラジコン(アメリカ)
    - Rotormast, オスプレイの1/18モデル, 全幅1.4m
    - <http://www.rotormast.com/en/>



# ティルトロータ形式2

- 無人機(その他の形状)

- 複数のロータのうち一部のロータをティルトする

- Boeing Phantom Swift(アメリカ)

- <https://www.youtube.com/watch?v=8N3RIaVYDdM>
    - DARPA X-plane プロジェクト, 30日以内に製作
    - 4つのロータのうち翼端の2つがティルト

- IAI Panther, Mini Panther(イスラエル)

- [http://www.iai.co.il/2013/36944-en/BusinessAreas\\_UnmannedAirSystems.aspx](http://www.iai.co.il/2013/36944-en/BusinessAreas_UnmannedAirSystems.aspx)
    - 3つのロータのうち前の2つがティルト
    - 全幅8m, 3.5m

- TURAC(トルコ)

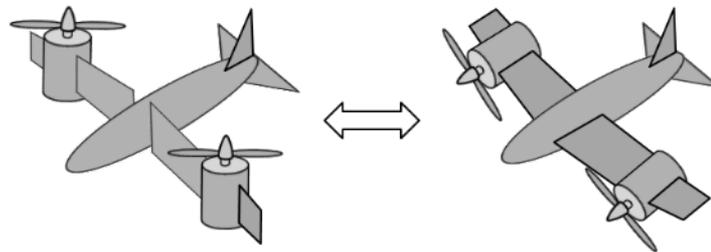
- A. Vuruskan et al., Proc of 2014 ICUAS
    - 3つのロータのうち前の2つがティルト
    - 全幅4.2m

- ラジコン(アメリカ)

- FireFLY6 VTOL Y6 , <http://www.birdseyeview.aero/>
    - Convergence VTOL, <http://www.e-fliterc.com/>
    - 3つのロータのうち前の2つがティルト

# ティルトウィング形式1

- ロータと主翼が一体となってティルトすることで、固定翼機モードと回転翼機モードを切り替える
  - ロータによる空気の流れと主翼との関係が固定されており、ティルト角による推力ロスがない
    - オスプレイでは、ホバリング時に10%のロス
  - 回転翼機モードでは、横風の影響を受けやすい



回転翼機モード

固定翼機モード



## • 有人実験機

- ヴォート XC-142(アメリカ): 1964年初飛行
- カナディア CL-84(カナダ): 1965年初飛行



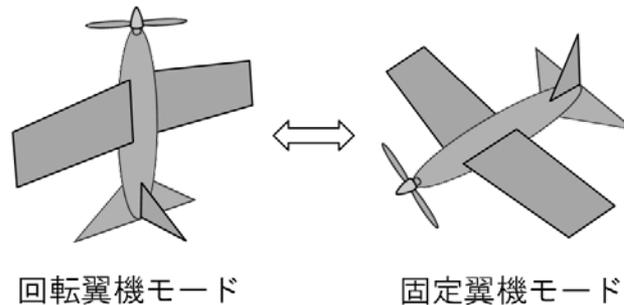
# ティルトウィング形式2

- 無人機 (Quad Tilt Wing)
  - JAXA (日本)
    - 全幅1.4m
  - 千葉大学 (日本)
    - 全幅1.3m
  - SUAVI (トルコ)
    - 動翼なし, 全幅1m
- 無人機 (その他の形状)
  - DHL (ドイツ)
    - 翼長2.0m
    - 車で30分の配送を8分で実現
  - NASA GL10 (アメリカ)
    - 10個のロータ, 固定翼時は一部のみ使用
    - 翼長3.2m (1/2スケール機)
  - Aurora Flight Sciences (アメリカ)
    - 24個のダクテッドファン, 固定翼時は一部のみ使用
    - DARPA X-Plane プログラム



# テイルシッター形式1

- 機体全体の姿勢を垂直, 水平に変更することで, 固定翼機モードと回転翼機モードを切り替える
  - ティルト機構が不要で, 重量を抑えられる
  - 回転翼機モードでは, 横風の影響を受けやすい

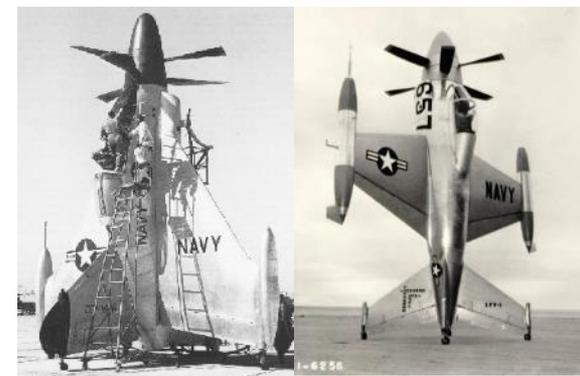


## • 有人実験機

- Convair XFY Pogo(アメリカ) 1954年
- Lockheed XFV(アメリカ) 1954年

## • 無人機(同じ形状)

- AeroVironment SkyTote(アメリカ)
  - 1998年~, 翼長2.4m

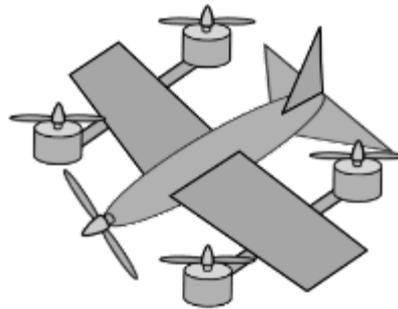


# テイルシッター形式2

- 無人機(マルチロータタイプ)
  - Quadshot(アメリカ)
    - <https://transition-robotics.com/>
    - 4つのロータでマルチコプタのような回転翼機モード
    - JumpShip: 8つのロータ
  - Parrot swing(フランス)
    - <https://www.parrot.com/us/minidrones/parrot-swing>
    - 速度 30km/h, 重量73g
  - ATOMOS(オランダ)
    - <http://www.atmosuav.com/>
  - Google Project Wing
    - <https://www.youtube.com/watch?v=cRTNvWcx9Oo>
- 無人機(その他のタイプ)
  - Wingtra(スイス)
    - ETHからのスピンオフ
    - 翼長 125cm, 最大飛行時間 55分
    - <https://wingtra.com/>
  - T-wing(オーストラリア)
    - <http://web.aeromech.usyd.edu.au//uav/twing/>

# 揚力・推力分離形式1

- 機体上方への揚力を発生するロータと機体前方への推力を発生するロータを個別に搭載し、それらの動作を制御することで、固定翼機モードと回転翼機モードを切り替える
  - ティルト機構は不要で、多様なロータ配置が考えられる
  - 重量が増加しやすい



- 有人機(compound helicopter)
  - Sikorsky X-wing(アメリカ)
    - 1983年～1988年



# 揚力・推力分離形式2

- 無人機

- Arcturus UAV JUMP20/15(アメリカ)

- <http://arcturus-uav.com/>

- JUMP20: 翼長5.6m, エンジン, JUMP15: 電動

- Airbus Quadcruiser(フランス)

- <http://www.airbusgroup.com/int/en/news-media/media~item=f2bf5171-ccd0-4863-80a6-bd1ee09731e5~.html>

- Amazon Prime Air

- [https://www.youtube.com/watch?v=MXo\\_d6tNWuY](https://www.youtube.com/watch?v=MXo_d6tNWuY)

- 自律システム研究所(日本)

- <http://www.acsl.co.jp/>

- 4つの揚力用+2つの推進用

- JAXA(日本)

- <http://www.aero.jaxa.jp/research/basic/propulsion/liftfan/>

- 4つの揚力用+2つの推進用

- エンルート(日本)

- <http://www.enroute.co.jp/home/2016/07/03/news2016070301/>

# VTOL機の特徴と課題

- 長所:

- 固定翼機と回転翼機の利点を併せ持つ



- 短所:

- 両モードを実現するための機構が必要で重量的に不利
  - 固定翼機モードでの動翼は回転翼機モードでは不要
  - 回転翼機モードの推力は固定翼機モードでは過大
  - ティルト機構など
- 機体設計が難しい
  - 低速から高速まで機体速度が大きく変化, ティルト角などでロータ後流も変化
  - とくに低速の空気力は複雑
- 制御系設計が難しい
  - モデル(浮上原理, アクチュエータ)の変化, モデル化誤差
  - 低速時の横風対応

# VTOL機研究開発の動向

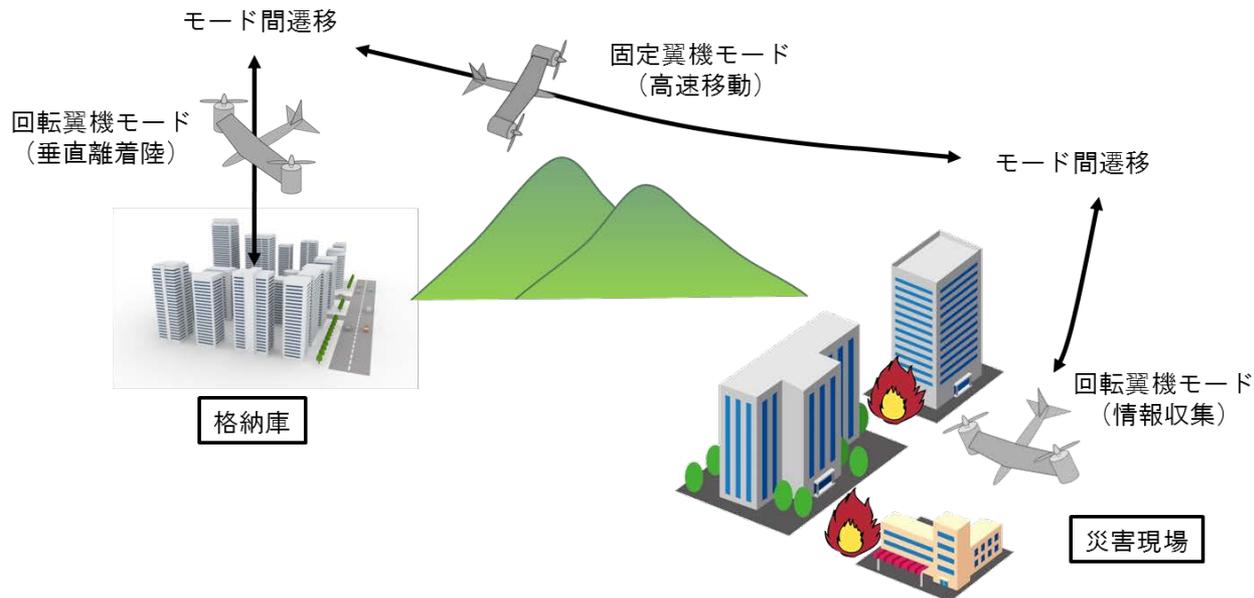
- 有人機の実用例は少ないが、研究開発は活発
- DARPA X-plane プログラム (2013年～)
  - VTOL機の性能を可能な限り向上させる革新的な機体の創造
  - Aurora Flight Sciencesがティルトウイング機を開発中
    - <http://www.darpa.mil/news-events/2016-03-03>
    - エンジンで発電して、24個のダクトファンを駆動
    - モードに応じて必要な分だけ動作
- 電動化による可能性
  - 複雑な機構を用いず、推進力を分散しやすい。
    - 様々なロータ配置など設計の自由度が増す
  - NASA GL10:
    - 10個のロータのティルトウイング
  - AgustaWestland Project Zero:
    - 電動によるティルトロータ
    - <http://www.leonardocompany.com/en/-/project-zero>



# VTOL型ドローンの活用例

- 災害時の情報収集システムの構築

- 広範囲に点在する被災地, 孤立した被災地
- 迅速かつ詳細に情報収集可能



- 遠隔地への配送

- 離島, 山間部などへの配送: 通常配送ではコストがかかる
- 災害時の孤立集落への緊急物資輸送: 離着陸場所, 航続距離

# (参考) VTOL型ドローンへの期待

- Airbus Cargo Drone Challenge
  - <https://localmotors.com/dronechallenge/>
  - VTOL機アイデアコンテスト
- ドローンタクシー
  - Uber
    - <https://www.uber.com/elevate.pdf>
  - A<sup>3</sup>/Airbus
    - <https://vahana.aero/>

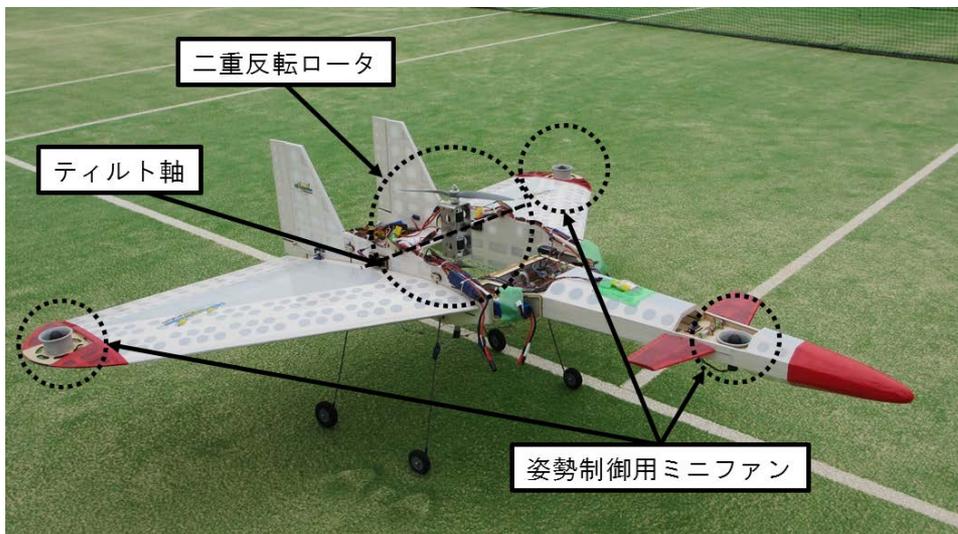
# 神戸大学でのティルトロータードローン開発

## 開発方針

- 小型サイズ(狭隘地侵入, 2m程度)
- 高い対人安全性
- 安定したホバリングの実現

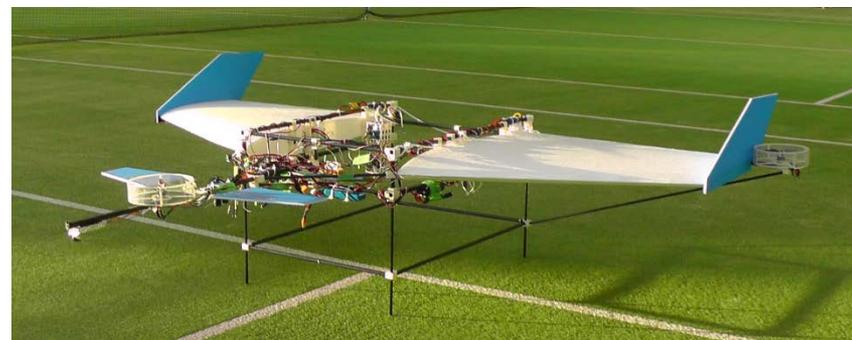
機体中央部の  
二重反転ロータ

3つの姿勢制御ファン



試作機2号機

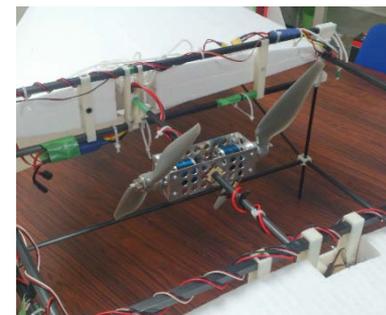
全長 : 1.5m  
翼長 : 1.8m  
重量 : 約4.5kg



試作機3号機



回転翼機モード



固定翼機モード

# 開発経過

- 試作0号機
  - 二重反転ユニットの検討
- 試作1号機
  - 手動で実現可能性を検討
- 試作2号機
  - 手動＋自動で飛行可能なことを確認
- 各モード小型実験機
  - 固定翼機モード専用, 回転翼機モード専用の機体
  - 各モードでの機体の見直し, 制御系の構築
- 試作3号機
  - 遷移飛行制御系への着手

2010年～

0号機



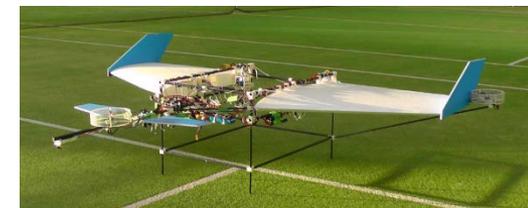
1号機



2号機



3号機



# 固定翼機モードの機体・制御系設計

- 試作2号機の結果

- 手動操縦でピッチが不安定



- 小型実験機による機体形状評価と制御系構築

- 実験機概要:

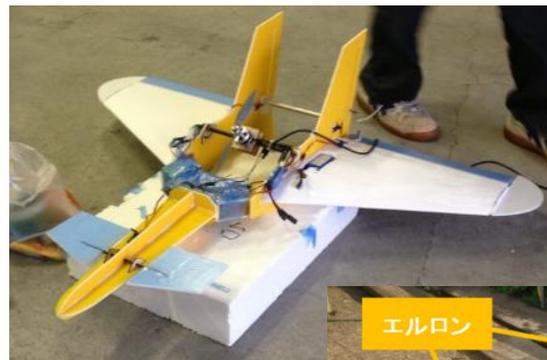
- 発泡スチロール＋スチレンボード
- 翼長 1.2m, 重量 1.1kg



発泡スチロールから切り出した主翼

- 機体改善点

- カナード翼面積の見直し
- メインロータ後流部
- 垂直尾翼の面積



- 制御系設計

- 手動操縦にもとづくシステム同定
  - 定常飛行周りの線形化モデル
- 線形フィードバック制御



# システム同定

- 線形化した運動方程式(低次元化):

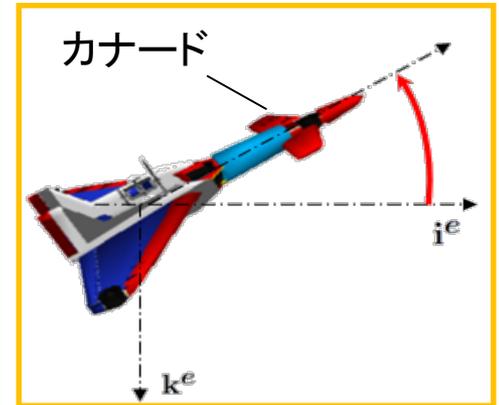
## 縦運動

$$\dot{x}_1 = A_1 x_1 + B_1 u_1$$

$x_1$  : ピッチ角・角速度, 迎え角,  
速度

$u_1$  : カナード舵角

※ 高度なし, スロットル一定



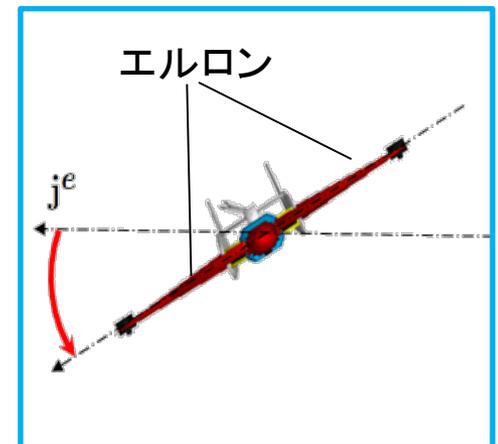
## 横運動

$$\dot{x}_2 = A_2 x_2 + B_2 u_2$$

$x_2$  : ロール角・角速度,  
ヨー角速度, 横滑り角

$u_2$  : エルロン舵角

※ ヨー角なし, ラダ不使用



➡ この2つのシステムについてシステム同定

# システム同定実験

## 対象システムへの同定用入力

対象とするシステム(モード)を  
十分励起させる必要がある

## 本実験

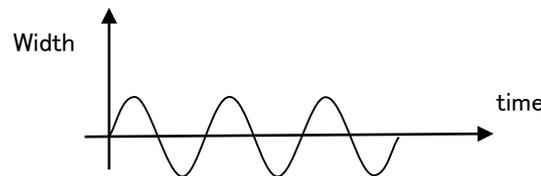
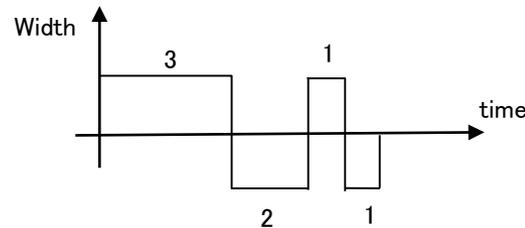
カナードへ

3-2-1-1入力

sin波

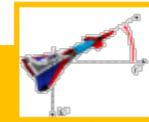
エルロンへ

sin波

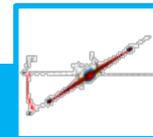


Waveletを用いた同定手法を適用  
(成岡, 東京大学博士論文, 2010)

縦運動



横運動



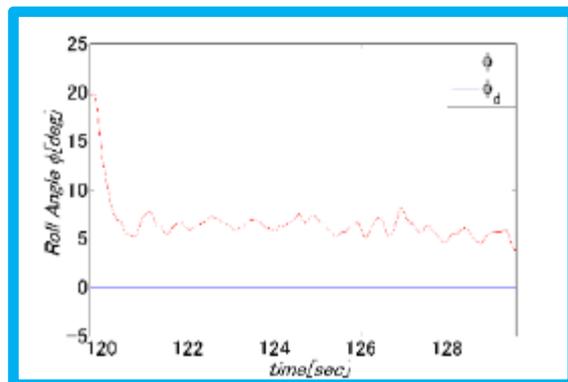
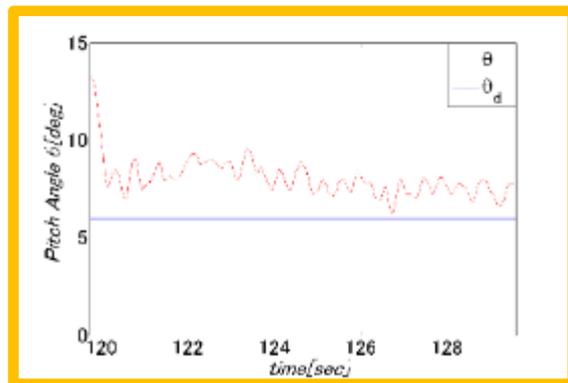
# 飛行制御実験

- ピッチ角, ロール角に対するPD制御

目標ピッチ角 :  $\theta_d = 6.0[deg]$

目標ロール角 :  $\phi_d = 0.0[deg]$

ティルト角は45° 固定



# 回転翼機モードの機体・制御系設計

- 試作2号機の結果

- 半自動制御でホバリング可
- 自動制御でホバリング可
- 機体の剛性不足



- 小型実験機による機体改善と制御系構築

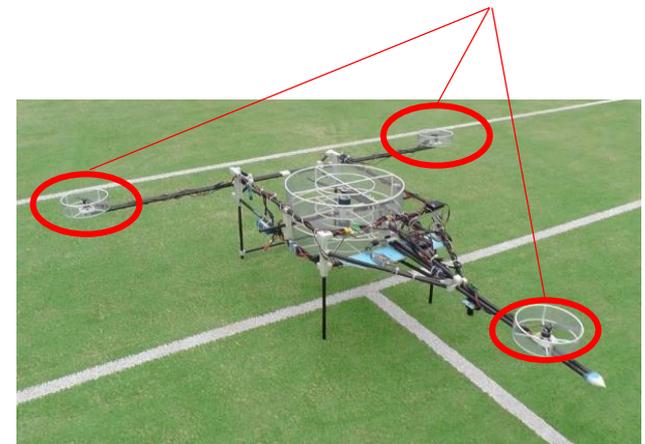
- 実験機概要:

- カーボンパイプによるフレーム
- 翼長 1.5m, 重量 2.3kg

- 制御系設計

- マルチコプタと同様な制御系

3つの姿勢制御ファン

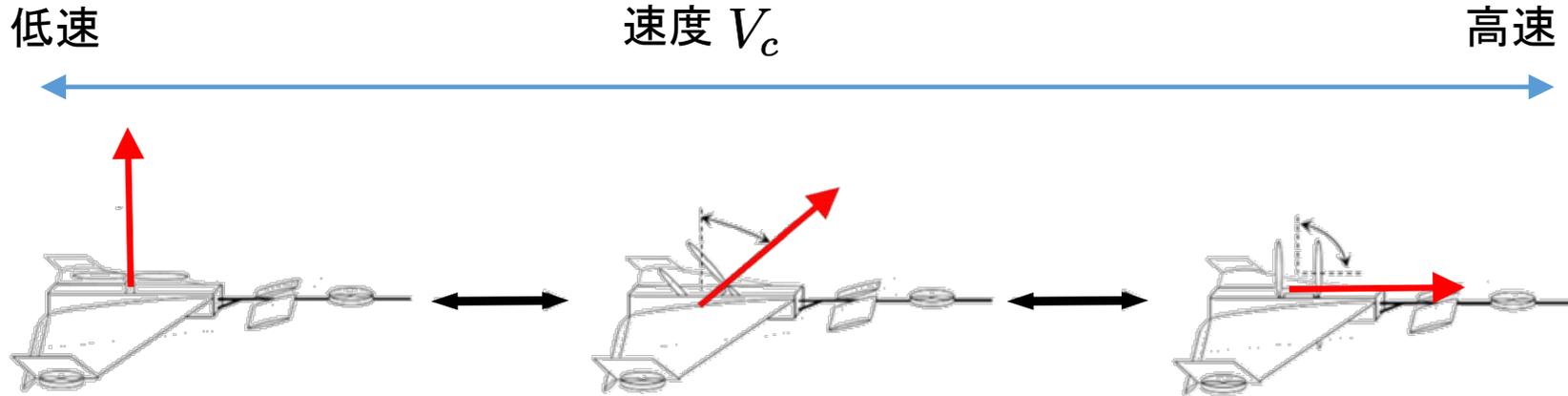


- 試作3号機の結果

- 自動制御可能だが

- より高い剛性
- 強風時のロバスト性・制御方法

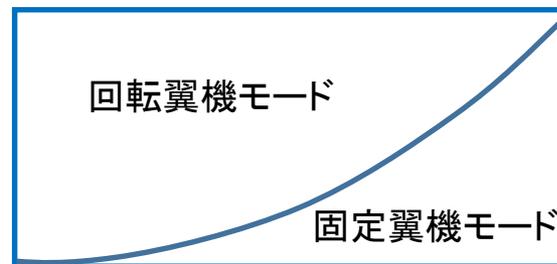
# モード間遷移のための制御系設計



	回転翼機モード	モード間遷移	固定翼機モード
浮上揚力	メインロータ+ミニファン	メインロータ+ミニファン 主翼揚力	主翼揚力
姿勢制御	ミニファン	ミニファン 動翼	動翼

制御の考え方:

制御量



↑  
 $V_c^2$  に比例する力

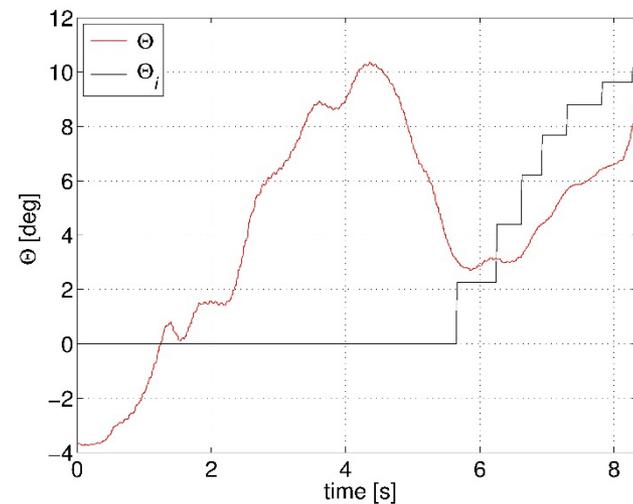
※ 非定常な空気力は考慮していない

$V_c = 0$

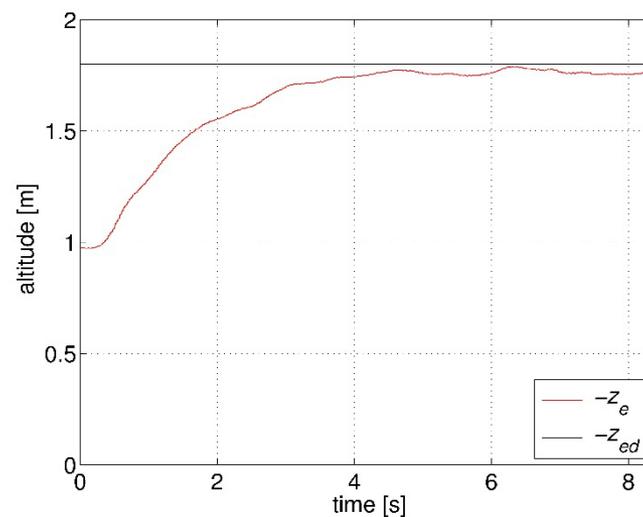
$V_c = V_{cd}$

# モード間遷移実験

- ワイヤ吊り下げ状態での実験



ピッチ角



高度

# エアロセンス(株)との共同開発

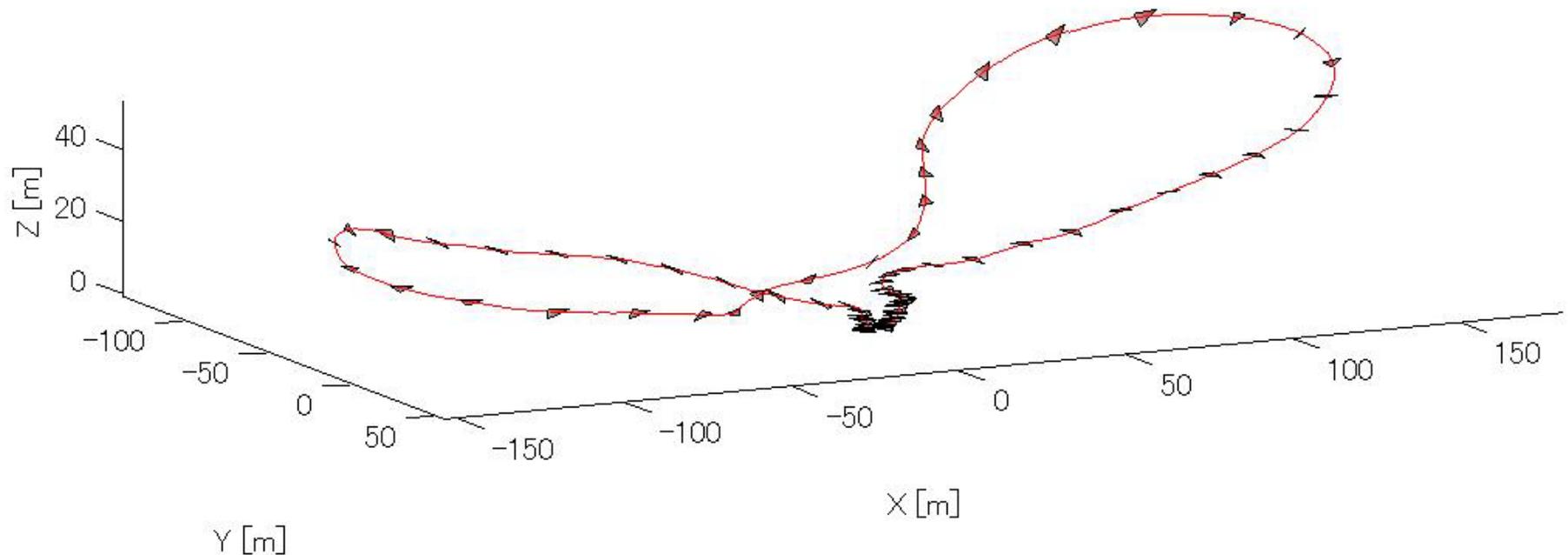
- エアロセンス(株)
  - 2015年8月 設立
  - ZMP, ソニーモバイルコミュニケーションズによるドローンベンチャー
  - マルチコプタによる測量など
- VTOL型ドローンの共同開発(2015年1月～)
  - 神戸大学機体をベースに設計を全面見直し
    - 機体剛性の大幅な向上
      - 直径25mmのカーボンパイプフレーム
    - カナードの廃止
      - 主翼後縁の動翼をエレボンとして使用
  - 全長: 1.6m
  - 翼長: 2.2m
  - 重量: ~約9.5kg
  - デザイン: 東京藝術大学 長濱 雅彦 先生
  - 航空アドバイス: 帝京大学 米田 洋 先生



エアロセンス  
AS-DT01-E

# 共同開発機体での飛行試験1

- 2015年7月 VTOL機として初飛行
  - 手動操縦
    - 回転翼機モード時: 手動操縦による姿勢目標値に安定化
    - 固定翼機モード時: 手動操縦による動翼の動作
    - モード間遷移時: 速度の2乗に比例して, 2つのモードの入力を自動配分



# 共同開発機体での飛行試験2

- ある程度の自律飛行を実現(エアロセンス)
- 現在の取り組み(神戸大)
  - 飛行特性の向上/高性能化
  - 安定性の高い自律飛行制御系構築



固定翼機モード



回転翼機モード

# まとめ

- 従来ドローン
  - 回転翼型ドローン
    - 垂直離着陸/ホバリング → 狭隘地運用が可能
    - ただし, 長距離/高速移動は難しい
  - 固定翼型ドローン
    - 主翼揚力による高効率飛行 → 長距離/高速移動が可能
    - ただし, 狭隘地運用は難しい
- VTOL型ドローン
  - 固定翼機モードと回転翼機モードを切り替え可能
  - 狭隘地運用性と長距離/高速移動を両立
  - ただし, 実現には以下が必要
    - 2つのモードをバランスさせる機体設計
    - 速度に応じて大きく変化する力学に対応する制御系設計
  - 世界中で進むVTOL型ドローンの研究開発
    - 電動化による設計自由度の増加
  - 神戸大学とエアロセンスにおける開発事例の紹介



# 謝辞

- これまでに受けた助成金

- 関西エネルギー・リサイクル科学研究振興財団研究助成, 平成22年度
- 川西記念新明和教育財団研究助成, 平成24年度
- スズキ財団科学技術研究助成金, 平成24年度
- 倉田記念日立科学技術財団倉田奨励金, 平成24年度
- JR西日本あんしん社会財団研究助成, 平成27年度
- 伊藤忠兵衛基金学術研究助成金, 平成27年度
- 三豊科学技術振興協会研究助成, 平成28年度
- JKA財団研究補助, 平成29, 30年度(予定)